

# 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau  
von Makro bis Nano /  
Mechanical Engineering  
from Macro to Nano**

**Proceedings**

Fakultät für Maschinenbau /  
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

## Impressum

Herausgeber:	Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
Redaktion:	Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten Andrea Schneider  Fakultät für Maschinenbau Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz, Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte, Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß, Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges, Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer, Dipl.-Ing. Silke Stauche
Redaktionsschluss: (CD-Rom-Ausgabe)	31. August 2005
Technische Realisierung: (CD-Rom-Ausgabe)	Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau Dipl.-Ing. Christian Weigel Dipl.-Ing. Helge Drumm Dipl.-Ing. Marco Albrecht
Technische Realisierung: (Online-Ausgabe)	Universitätsbibliothek Ilmenau <a href="#">ilmedia</a> Postfach 10 05 65 98684 Ilmenau
Verlag:	 Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V. Werner-von-Siemens-Str. 16 98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe):	3-932633-98-9	(978-3-932633-98-0)
ISBN (CD-Rom-Ausgabe):	3-932633-99-7	(978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:  
<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

**M. Suske / W. Holzapfel**

## **Broadband Vibration Detection by Laser Force Transducers**

### **ABSTRACT**

Mechanical and acoustical vibrations in the DC to Megahertz-range can be detected with high resolution by novel force transducers. The transducers apply the photoelastic effect inside Nd:YAG microlasers (1064 nm) which causes force induced modulation of the optical frequency/polarisation. By simple autodyne detection and electrical signal processing we get information about frequency, amplitude and phase of the vibration components. Oscillating and pulse forces are generated by a PCT drive in a special dynamic test set up. We describe the measurement principle, the experimental set up as well as signal processing procedures and present results of our measurements.

### **1 EINLEITUNG**

Die präzise Messung von Schwingungen und ihren verursachenden Kräften ist in der Wissenschaft und Technik eine weitverbreitete Aufgabe. Prinzipiell sind schwingweg-, geschwindigkeits- und beschleunigungsmessende Verfahren zu unterscheiden. In vielen Anwendungsfällen muss der zeitliche Verlauf der Schwingkräfte in einer mechanischen Struktur aufgezeichnet werden. Bei der Verwendung von taktilen Kraftsensoren müssen diese in den Kraftfluss der Struktur integriert werden. Hierzu sollte der Kraftsensor sehr steif sein und eine geringe Dämpfung aufweisen, um möglichst wenig Rückwirkung auf die Dynamik des zu vermessenden mechanischen Systems zu verursachen. Zur exakten Erfassung des Zeitverlaufs muss ferner die Bandbreite des Sensors größer als die maximal zu erwartende Schwingungsfrequenz der Struktur sein.

Von besonderem Interesse ist hier die Erfassung von transienten Schwingungen bei mechanischen Strukturen sowie die schnelle rechnerische Extrapolation auf den statischen Endwert dieser Schwingungen (Prädiktion). Ein Beispiel hierfür bieten dynamische Waagen, die annähernd sprungförmig belastet werden. Daraufhin treten schwach gedämpfte Einschwingvorgänge auf. Um die Messzeit zu verkürzen wird nicht das Ende des Einschwingvorgangs abgewartet, sondern anhand der Abtastwerte der Schwingung der statische Endwert vorhergesagt. Ein weiteres Beispiel sind mechanische Prüfstände, die für Belastungstests u. ä. eingesetzt werden.

Eine neue Methode zur präzisen Messung von statischen und dynamischen Kräften ist die Frequenzverstimmung von Festkörperlasern unter Nutzung des photoelastischen Effekts [1], [2], [3]. Laserkristalle weisen eine sehr hohe Steifigkeit auf und zeigen aufgrund ihres monokristallinen Aufbaus nach einer Kraftbelastung kein störendes Kriechen oder Hysterese. Die Frequenz ist zudem ein sehr störungssicher übertragbares und hochauflösend messbares Signal.

## 2 MESSPRINZIP DES LASERKRAFTSENSORS

Der Laserkraftsensor besteht aus einem meist zylindrischen Nd:YAG-Kristall, der mit einer Laserdiode optisch gepumpt wird und sein Laserlicht im Infrarotbereich ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ) aussendet. Im Laserstrahl sind zwei orthogonal polarisierte Lasermode enthalten, deren Frequenz und Polarisationslage entsprechend dem photoelastischen Effekt abhängig von den mechanischen Hauptspannungen im Kristall sind [1]. Der auf einer Unterlage liegende Kristall wird mit der zu messenden Kraft beaufschlagt (Bild 1a). Daraufhin spalten die optischen Frequenzen der Lasermode auf und die Differenzfrequenz zwischen den beiden verhält sich proportional zur aufgebrachten Kraft  $F_x$ . Hierfür muss die Kraft parallel zur linearen Offsetpolarisation sein. Der Laserstrahl wird dann von einem Detektor aufgenommen (Bild 1b). Die optischen Frequenzen der beiden Lasermode selbst sind so hoch, dass sie bei autodyner Detektion nur als elektrischer Gleichanteil (DC-Anteil) erscheinen. Der Wechselanteil (AC-Anteil) der elektrischen Detektorausgangsspannung  $u_{\text{Beat}}$  tritt mit der sogenannten Beatfrequenz  $f_{\text{Beat}}$  auf, die identisch ist mit dem Betrag der optischen Differenzfrequenz. Die Beatfrequenz  $f_{\text{Beat}}$  ändert sich somit proportional zur aufgebrachten Kraft  $F_x$ :

$$f_{\text{Beat}} = E_{\text{mess}} \cdot F_x + f_{\text{Beat0}} \quad (1)$$

mit der Messempfindlichkeit

$$E_{\text{mess}} = \frac{G \cdot \nu \cdot C_0}{n \cdot L \cdot D} \quad (2)$$

Darin sind:  $G$  ein Geometriefaktor, der von der Form der Unterlage bestimmt ist,  $\nu$  die mittlere Laserfrequenz,  $C_0$  die materialspezifische photoelastische Konstante,  $n$  die Brechzahl,  $L$  und  $D$  die Länge und der Durchmesser des Laserkristalls sowie  $f_{\text{Beat0}}$  der Beatfrequenz-Offset.

Der übliche Kraftmessbereich eines Laserkristalls mit dem Durchmesser 3 mm und der Länge 5 mm reicht bis  $F_x = 100 \text{ N}$ , das entspricht einer noch gut messbaren Beatfrequenz  $f_{\text{Beat}} = 2,5 \text{ GHz}$ , bei einer typischen Empfindlichkeit  $E_{\text{mess}} = 25 \text{ MHz/N}$ . Der Beatfrequenz-Offset eines Laserkraft-

sensors beträgt einige Megahertz, kann aber durch eine entsprechende Vorspannung des Kristalls fast beliebig erhöht bzw. reduziert werden. Die Beatfrequenz-Kraft-Kennlinie (Gl. (1)) ist experimentell nachgewiesen über neun Dekaden linear [1].

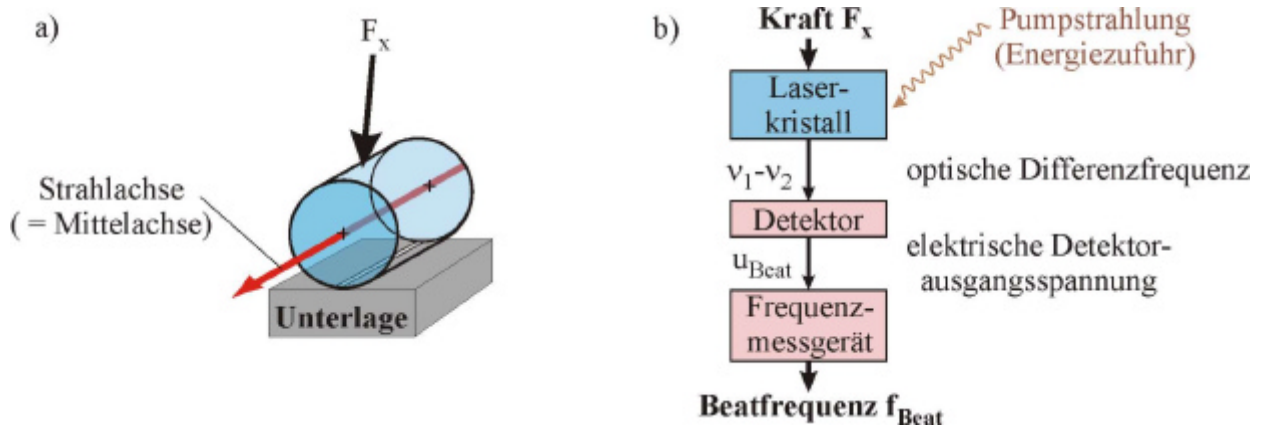


Bild 1: (a) Laserkristall auf Unterlage (Minimalkonfiguration) mit der zu messenden Kraft  $F_x$ , (b)Wandlungskette der Kraft  $F_x$  in die Beatfrequenz  $f_{\text{Beat}}$ .

Die zu messende Kraft  $F_x$  muss nicht konstant sein. Bei einer sinusförmig modulierten Kraft  $F_x$  ist die Detektorausgangsspannung  $u_{\text{Beat}}$  ein FM-Signal mit der nun zeitabhängigen Beatfrequenz  $f_{\text{Beat}}$  (Bild 2 a). Innerhalb der Messbandbreite des Laserkraftsensors entspricht der Modulationshub der Beatfrequenz gemäß der Gl. (1) dem Modulationshub der Kraft und die Modulationsrate der Beatfrequenz ist identisch mit der Modulationsrate der Kraft.

Die Messbandbreite des Laserkraftsensors lässt sich mit seiner Minimalkonfiguration [1] bestimmen. Diese beschreibt die dynamische Wandlung der am Mantel des Laserkraftsensors angreifenden Kraft  $F_x$  in die in der Strahlachse wirkende Kraft  $F_{\text{mess}}$ . Diese Kraft  $F_{\text{mess}}$  moduliert die Beatfrequenz  $f_{\text{Beat}}$  praktisch ohne Verzögerung [4]. Die Messbandbreite des Laserkraftsensors und damit der dynamische Gültigkeitsbereich der Gl. (1) ist also durch die Übertragungsfunktion zwischen der am Mantel angreifenden Kraft  $F_x$  und der im Inneren des Laserkristalls wirkenden Kraft  $F_{\text{mess}}$  gegeben [1].

$$\frac{F_{\text{mess}}}{F_x} = \frac{\frac{1}{2}m_L s^2 + d_{\text{EQ}} s + k_{\text{EQ}}}{m_L s^2 + d_{\text{EQ}} s + k_{\text{EQ}}} \quad (3)$$

Darin bezeichnen  $k_{\text{EQ}}$  und  $d_{\text{EQ}}$  die Kontaktsteifigkeit bzw. die Kontaktdämpfung zwischen dem Laserkristall und der Unterlage,  $m_L$  ist die Masse des Laserkristalls,  $s$  ist der Laplace-Operator. Die Steifigkeit des Laserkraftsensors, die sich aus der Körpersteifigkeit des Kristalls und den Kontaktsteifigkeiten zwischen dem Kristall und dem Messobjekt ergibt [1], liegt im Bereich um

$k_{\text{ges}} = 10^6 \text{ N/m}$ . Dabei gilt, je steifer die Unterlage ist, desto höher ist die Kontaktsteifigkeit und desto höher ist die Resonanzfrequenz der Minimalkonfiguration.

Für eine Unterlage aus Stahl werden Kraftänderungen  $F_x$  bis rund 100 kHz eins zu eins in eine Änderung der Beatfrequenz umgesetzt (Bild 2 b). Die Messbandbreite, innerhalb der verzerrungsfrei gemessen werden kann, reicht von DC bis dicht an die Resonanz/Antiresonanzstelle. Oberhalb der Resonanz/Antiresonanzstelle (ca. 120 kHz) beträgt der dynamische Übertragungsfaktor noch 0,5. Wegen der hohen Resonanzfrequenz sind nur kleine Dämpfungskonstanten infolge der Kontaktdämpfung zu erwarten.

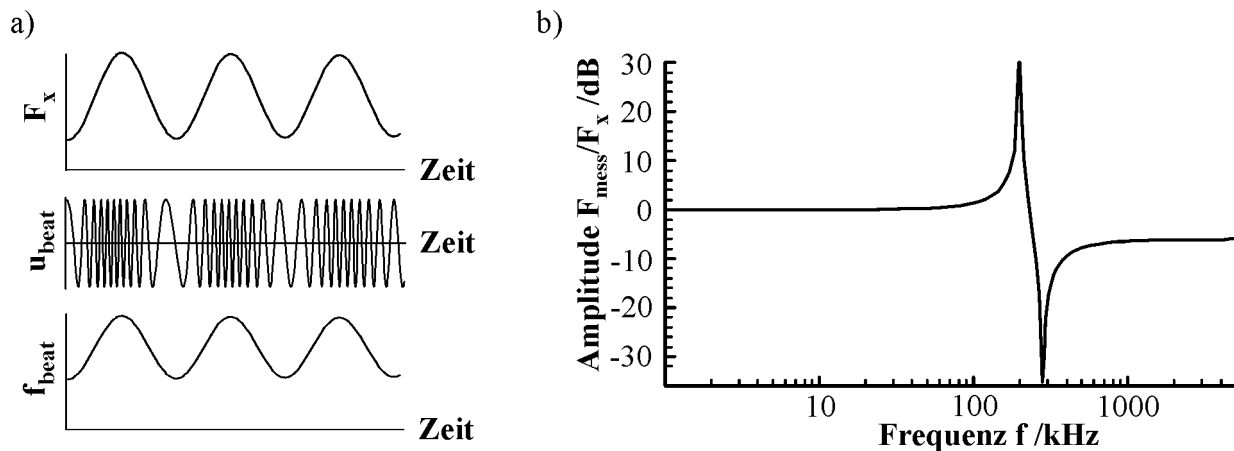


Bild 2: (a) Modulation der Beatfrequenz  $f_{\text{Beat}}$  der Detektor-Ausgangsspannung  $u_{\text{Beat}}$  durch eine oszillierende Kraft  $F_x$  und (b) Amplitudengang der Minimalkonfiguration des Laserkraftsensors auf einer Unterlage aus Stahl [1].

Die Messempfindlichkeit  $E_{\text{mess}}$  des Laserkraftsensors hängt nicht von seiner Messbandbreite ab. Dies folgt aus den Gln. (2) und (3), die keine gemeinsamen Parameter besitzen.

### 3 EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE

#### 3.1 Optischer Versuchsaufbau und Prüfstand

Für eine Messung des zeitlichen Verlaufs von Kräften  $F_x$  muss der Laserkristall in das zu untersuchende Schwingungssystem eingebaut und die Beatfrequenz  $f_{\text{Beat}}$  aufgezeichnet werden. Dafür wurde ein dynamischer Kraftprüfstand verwendet, in dem mechanische Schwingungen reproduzierbar erzeugt werden können. Der optische Versuchsaufbau ist im Bild 3 gezeigt.

Im Prüfstand (Bild 4) ist der Laserkraftsensor taktil mit einem Piezoaktor verspannt. Die statische Vorspannkraft kann mit Schrauben eingestellt werden. Wenn nun an den Piezoaktor die Spannung  $u_{\text{Piezo}}$  angelegt wird, dehnt er sich aus und erhöht so dynamisch die Vorspannkraft entsprechend den Steifigkeiten des Prüfstands.

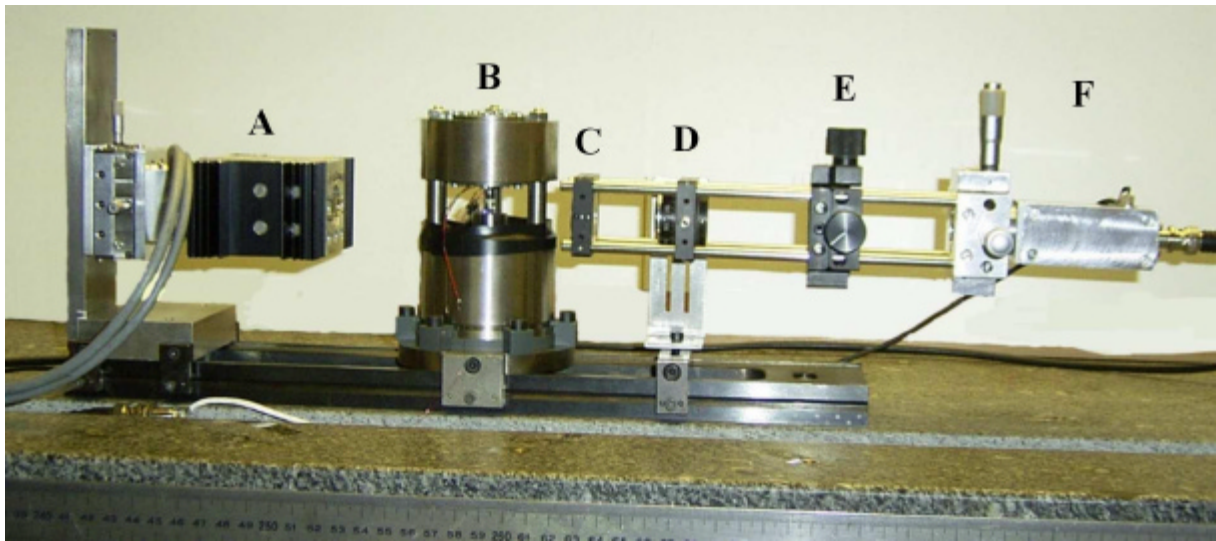


Bild 3: Optischer Versuchsaufbau mit Prüfstand zur dynamischen Krafterzeugung. (A: Pumpdiode, B: Prüfstand, C: Kantenfilter, D: 45°-Polarisator, E: justierbare Fokussierlinse, F: justierbarer Detektor)

Das dynamische Verhalten dieses Prüfstands wird mit einem Fünf-Massen-Modell [1] beschrieben. Darin wird die Piezoaktor-Ansteuerspannung  $u_{\text{Piezo}}$  zunächst in die Kraft  $F_x$  am Mantel des Laserkraftsensors und schließlich in die innere Kraft  $F_{\text{mess}}$  bzw. die Beatfrequenz  $f_{\text{Beat}}$  gewandelt. Unsere Untersuchungen zeigen, dass bei sinusförmiger Ansteuerspannung auch bei Modulationsfrequenzen von 100 kHz eine hochgradig verzerrungsfreie Umsetzung in die Beatfrequenz erfolgt [1]. Frequenzgangmessungen mit dem Lasersensor sind daher durchführbar.

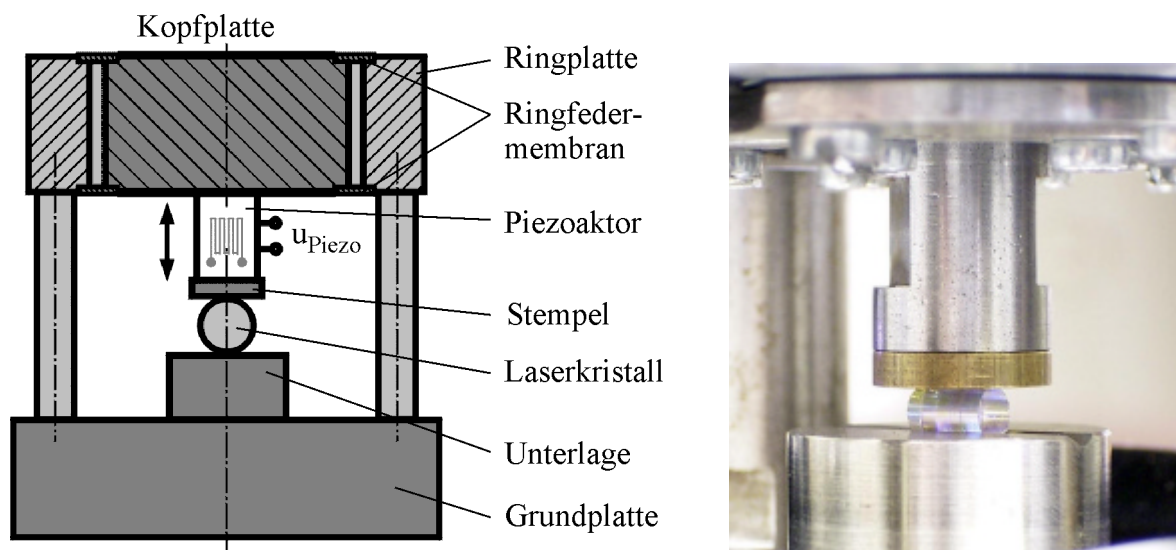


Bild 4: Prinzipaufbau und Detailfoto des Prüfstands zur dynamischen Krafterzeugung.

Das Bild 5 vergleicht den aus dem Fünf-Massen-Modell berechneten Amplitudengang des Prüfstands mit dem vom Laserkraftsensor gemessenen Amplitudengang. Bis zu Modulationsfrequenzen  $f_{\text{mod}}$  von 80 kHz stimmen die berechneten mit den gemessenen Ergebnissen sehr gut überein.

Darüber hinaus können mit der FM-Detektion auch erfolgreich Resonanzüberhöhungen des Amplitudenganges bis in den Megahertz-Bereich nachgewiesen werden [1], [4]. Die hochfrequenten mechanischen Schwingungen entstehen vermutlich durch Körperschall, der vom Piezoaktor generiert wird.

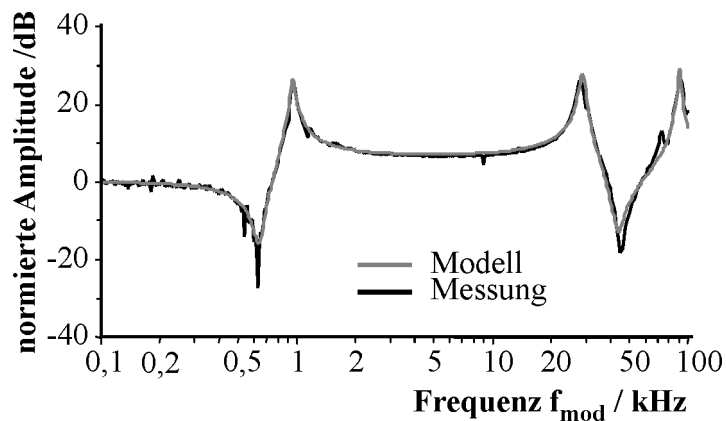


Bild 5: Berechneter und gemessener Amplitudengang  $|f_{\text{Beat}}/\hat{u}_{\text{Piezo}}|$  des dynamischen Kraftprüfstands. Die modulierende Frequenz  $f_{\text{mod}}$  entspricht der Frequenz der Piezoaktor-Ansteuerspannung  $u_{\text{Piezo}}$  [1].

### 3.2 Messung von transienten Schwingungen

Die transienten Schwingungen werden durch Sprunganregung des Prüfstands erzeugt und treten als gedämpfte Eigenschwingungen des mechanischen Systems auf. Dazu werden rechteckförmige Piezoaktor-Ansteuerspannungen mit der Amplitude 1 V gewählt, die einen einseitigen Kraftsprung  $\Delta F_{\text{ein}} \approx 0,1 \text{ N}$  erzeugt. Durch diese Krafteingangssignale werden alle Eigenfrequenzen des Prüfstands angeregt und die Linearität zwischen der Piezoansteuerspannung  $u_{\text{Piezo}}$  und erzeugter Kraft  $\Delta F_{\text{ein}}$  bleibt bewahrt. Nach dem Abklingen des Einschwingvorgangs entspricht der Hub  $\Delta F_x$  der auf den Laserkraftsensor einwirkenden Kraft  $F_x$  exakt dem Kraftsprung  $\Delta F_{\text{ein}}$ . Während der Einschwingdauer wird die zeitabhängige Beatfrequenz  $f_{\text{Beat}}$  des Laserkraftsensors mit dem Modulations-Analysator HP 53310A, der den zeitlichen Verlauf der Frequenz eines FM-Signals misst, aufgezeichnet.

Das Bild 6 zeigt den gemessenen Einschwingvorgang mit der gewählten Messrate von  $f_{\text{sample}} = 22,5 \text{ kHz}$ . Dargestellt ist die Beatfrequenzänderung  $\Delta f_{\text{Beat}}$ . Der Offsetwert  $f_{\text{Beat}0}$  der Beatfrequenz ist nicht dargestellt, da er nur von der statischen Vorspannung und nicht vom erzeugten Kraftsprung abhängig ist. Deutlich sind mehrere mechanische Eigenfrequenzen zu erkennen. Der Abstand der Maxima beträgt rund eine Millisekunde, was einer mechanischen



Eigenfrequenz von einem Kilohertz entspricht. Die Dämpfung des Prüfstands ist sehr gering, auch nach 20 ms sind noch deutliche Schwingungen zu erkennen. Dieses Systemverhalten bestätigt die Vermutung, dass nicht nur die Prüfstand- sondern auch die Sensordämpfung selbst sehr schwach ist.

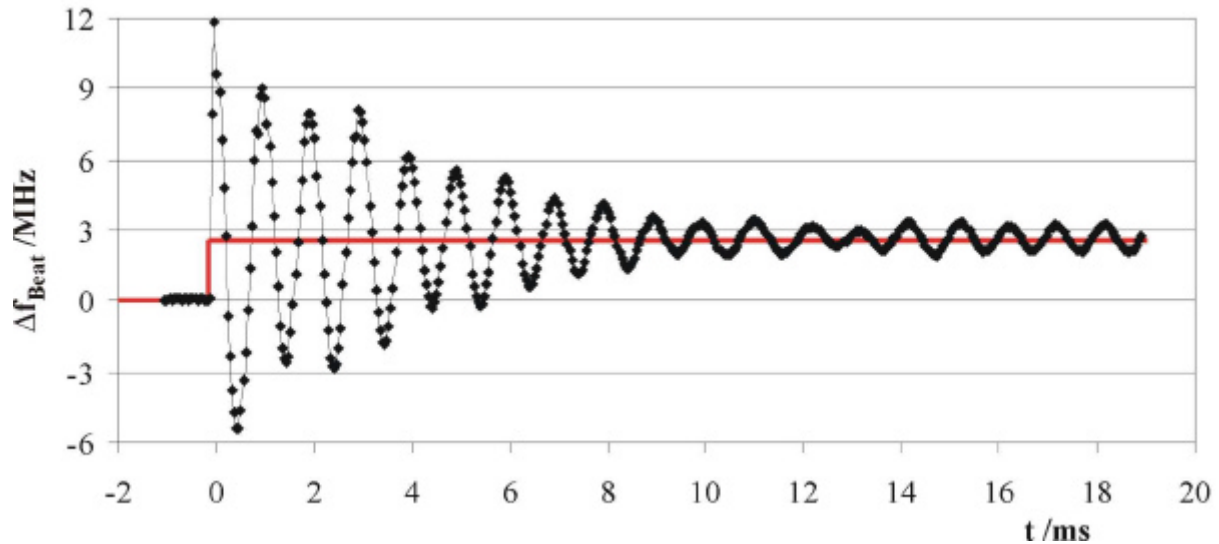


Bild 6: Gemessener zeitlicher Verlauf der Beatfrequenzänderung  $\Delta f_{\text{Beat}}$  bei der Sprungantwort des Prüfstands (Messrate  $f_{\text{sample}} = 22,5 \text{ kHz}$ ). Die rote Linie zeigt den umskalierten Kraftsprung  $\Delta F_{\text{ein}}$ .

Zur Analyse der mechanischen Eigenfrequenzen wurde der gemessene zeitliche Verlauf der kraftproportionalen Beatfrequenz  $f_{\text{Beat}}$  rechnerisch fouriertransformiert, um auf die Amplituden und Phasen der Eigenschwingungen zu schließen. Das so ermittelte Amplitudenspektrum zeigt die Modulationshübe der Beatfrequenz (Bild 7), aus denen auf die harmonischen Komponenten der

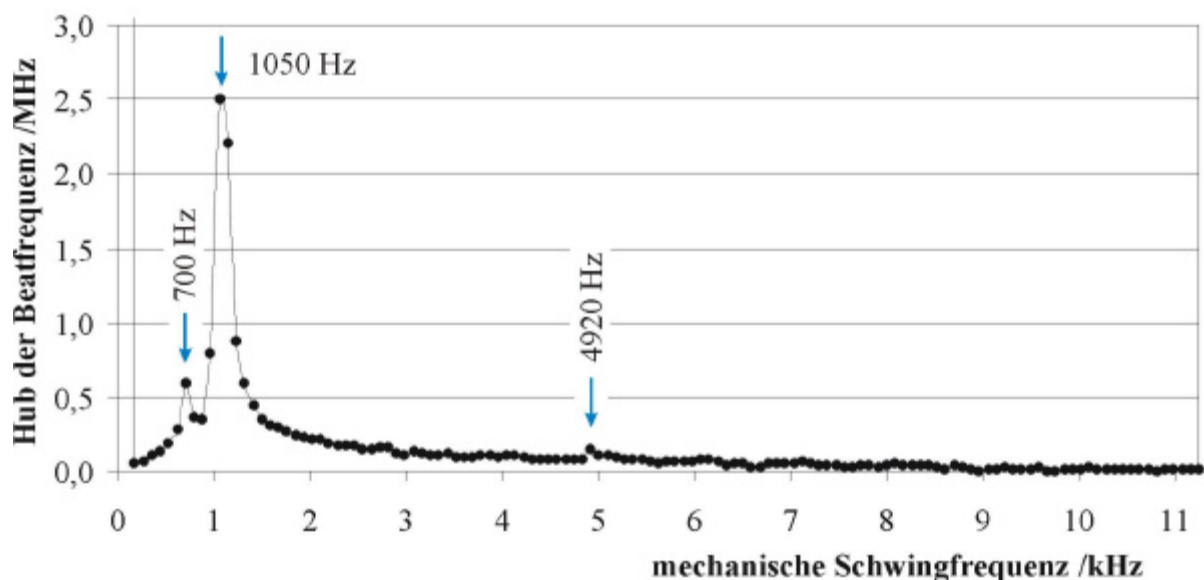


Bild 7: Amplitudenspektrum bzw. Modulationshübe der Beatfrequenz  $f_{\text{Beat}}$  bei der Sprungantwort des Prüfstands (Messrate  $f_{\text{sample}} = 22,5 \text{ kHz}$ ).

zeitabhängigen Kraft  $F_x$  zurückgeschlossen werden kann. Die Schwingfrequenzen der einwirkenden Kraft  $F_x$  sind dabei identisch mit den mechanischen Eigenfrequenzen des Prüfstands.

Hier dominiert die schon im Zeitbereich erkennbare mechanische Eigenfrequenz des Prüfstands von 1050 Hz. Ein deutlicher Hub ist ebenfalls bei der Eigenfrequenz von 700 Hz erkennbar. Weiterhin zeigt sich bei 4920 Hz ein kleiner Hub, der sich einer Eigenfrequenz des Prüfstands zuordnen lässt.

Im gemessenen Amplitudengang des Prüfstands zeigten sich auch höhere mechanische Eigenfrequenzen. Um diese in den Sprungantworten zu erfassen, muss die Beatfrequenz  $f_{\text{Beat}}$  mit einer höheren Messrate  $f_{\text{sample}}$  aufgezeichnet werden. Im Bild 8 ist der aufgezeichnete Verlauf der Beatfrequenz bei der Sprungantwort des Prüfstands mit einer Messrate  $f_{\text{sample}} = 333 \text{ kHz}$  gezeigt. Dabei war die Amplitude  $\hat{u}_{\text{Piezo}}$  der rechteckförmigen Piezoaktor-Ansteuerspannung so eingestellt, dass sie einen Kraftsprung von  $\Delta F_{\text{ein}} = 0,05 \text{ N}$  erzeugt.

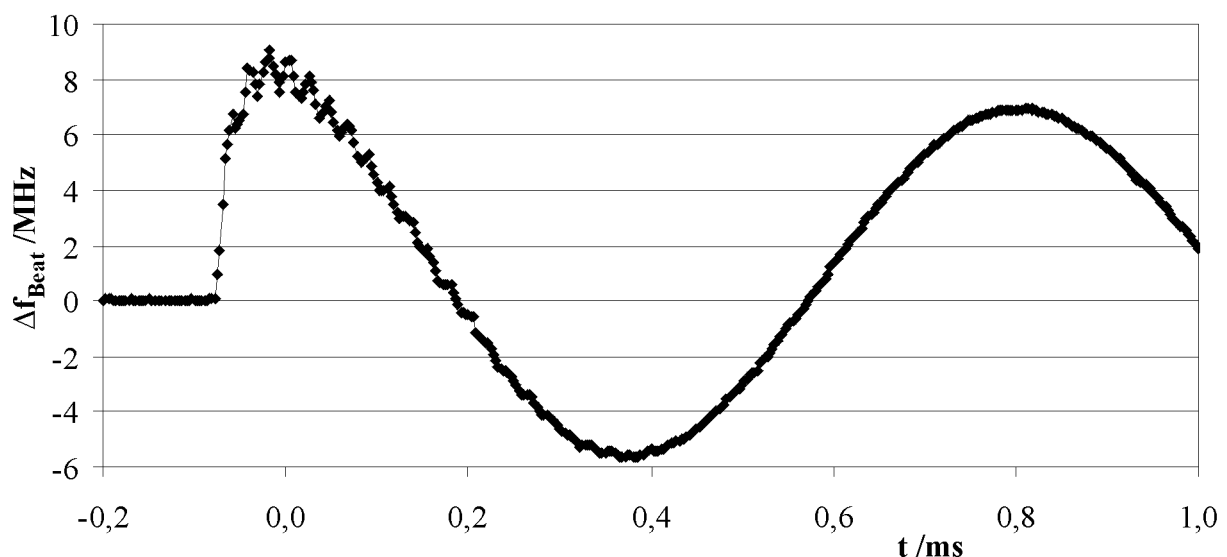


Bild 8: Gemessener zeitlicher Verlauf der Beatfrequenzänderung  $\Delta f_{\text{Beat}}$  bei der Sprungantwort des Prüfstands (Messrate  $f_{\text{sample}} = 333 \text{ kHz}$  ).

Mit der höheren Messrate  $f_{\text{sample}}$  zeigen sich auch wesentlich höherfrequente mechanische Schwingungen, die aber nach weniger als einer Millisekunde so weit abgeklungen sind, dass sie im Zeitbereich nicht mehr erkennbar sind. Im Bild 9 ist das durch Fourieranalyse ermittelte Amplitudenspektrum der aufgezeichneten Beatfrequenz gezeigt. Mechanische Eigenfrequenzen treten hier bei 41,7 kHz und bei 112 kHz auf. Die niedrigeren Eigenfrequenzen sind aufgrund des hohen Offsets der Beatfrequenz und der kurzen Aufzeichnungszeit von rund einer Millisekunde nicht mehr erkennbar.

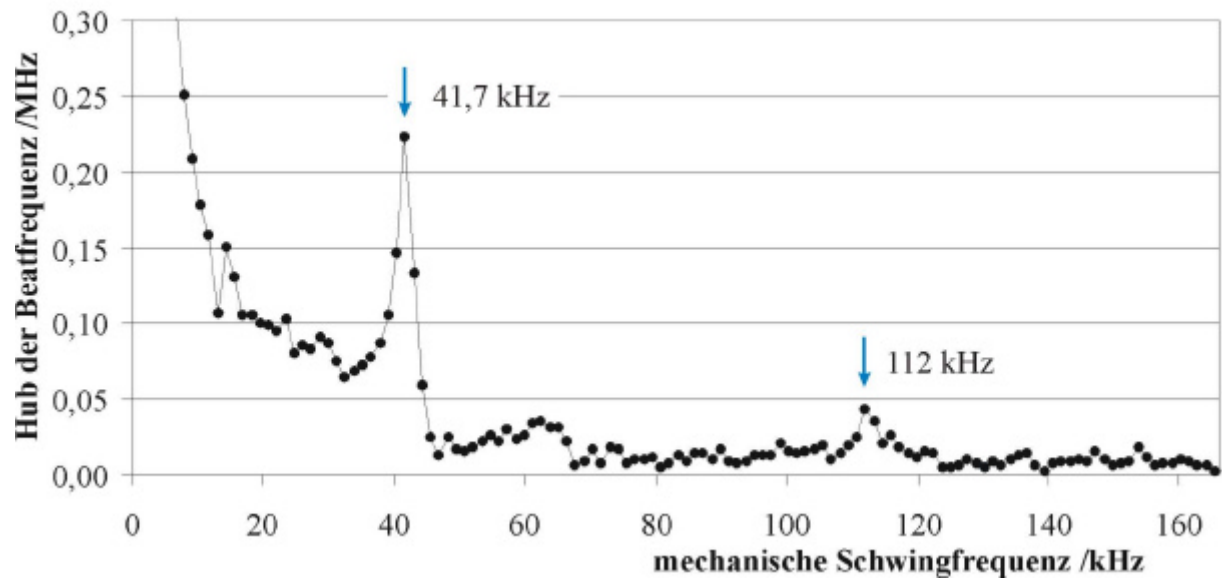


Bild 9: Amplitudenspektrum bzw. Modulationshübe der Beatfrequenz  $f_{\text{Beat}}$  bei der Sprungantwort des Prüfstands (Messrate  $f_{\text{sample}} = 333 \text{ kHz}$ ).

Die Auswertung des Phasenspektrums der transienten Schwingung bestätigt die Resonanzstellen, die aus dem Amplitudenspektrum entnommen werden können. In der Tabelle 1 sind die mechanischen Eigenfrequenzen aufgelistet, die bei den Messungen sowohl des Amplitudengangs als auch der Sprungantwort des Prüfstands zu erkennen sind.

Eigenfrequenz	hervorgerufen durch
700 Hz	Resonanz/Antiresonanz der Masse der Kopfplatte mit der Membranfeder
1050 Hz	Resonanz/Antiresonanz der Masse der Kopfplatte mit der Membranfeder
4920 Hz	Masse der Ringplatte und der Säulen mit der Befestigung der Ringplatte
41,7 kHz	Resonanz/Antiresonanz der Masse des Piezoaktors mit seiner Körpersteifigkeit und der Kontaktsteifigkeit zwischen Piezoaktor und Kopfplatte
112 kHz	Masse des Laserkristalls mit seiner Kontaktsteifigkeit zur Unterlage

Tabelle 1: Identifikation der Eigenfrequenzen des Kraftprüfstands.

### 3.3 Prädiktion des statischen Endwerts des Einschwingvorgangs

Während bisher die Schwingungskomponenten von transienten Schwingungen ermittelt wurden, ist hier der statische Endwert dieser Schwingungen von besonderem Interesse. Die Messergebnisse im vorigen Kapitel zeigen die geringe Dämpfung des Laserkraftsensors und des Prüfstands. Der statische Endwert der Sprungantwort wird erst spät (nach mehr als 20 ms) erreicht. Die schnelle Extrapolation auf den statischen Endwert auf Grundlage des transienten Verlaufs bzw. der bekannten Schwingungskomponenten ist häufig von technischem Interesse, beispielsweise in der dynamischen Wägetechnik. Der statische Endwert entspricht dem Gleichanteil des Einschwingvorgangs [5]. Der

Gleichanteil kann durch Tiefpassfilterung (z.B. Zeitreihenmittelung oder FIR-Filterung) ermittelt werden.

Bei dem frequenzanalogen Messsignal des Laserkraftsensors bietet sich die zeitliche Mittelung über die Torzeit des verwendeten Frequenz-Zählers an. Das Problem ist, dass nur bei unendlicher Mittelungszeit exakt der zeitliche Mittelwert des Einschwingvorgangs erfasst werden kann. Unsere Untersuchungen zeigen jedoch, dass schon nach Mittelungszeiten im Millisekunden-Bereich die Abweichungen des Mittelwerts vom statischen Endwert nur gering sind.

Bei der ereignisgesteuerten Frequenzzählung misst ein Frequenz-Zähler die Zeit  $T_n$ , die die Detektor-Ausgangsspannung  $u_{\text{Beat}}$  für eine gewählte Anzahl  $n$  von Nulldurchgängen benötigt. Entsprechend der Gl. (4) wird so die mittlere Beatfrequenz  $\bar{f}_{\text{Beat}}$  ermittelt, die die Detektor-Ausgangsspannung während dieser  $n$  Nulldurchgänge hat. Dabei muss beachtet werden, dass pro Signalperiode zwei Nulldurchgänge stattfinden.

$$\bar{f}_{\text{Beat}} = \frac{n}{2 T_n} \quad (4)$$

Die zeitlichen Abstände zwischen den so gemittelten Frequenzmesswerten  $\bar{f}_{\text{Beat}}$  könnten prinzipiell unterschiedlich lang sein, da sie von der Signalfrequenz  $f_{\text{Beat}}$  abhängen. Alle Frequenz-Zähler benötigen jedoch zusätzlich eine gewisse Totzeit, um die Messwerte zu verarbeiten und an einen angeschlossenen Rechner zu senden. Aus der Gl. (4) folgt, dass bei einem idealen Frequenz-Zähler mit vernachlässigbarer Totzeit die Messrate  $f_{\text{sample}}$  maximal gleich der reziproken Torzeit  $T_n$  sein kann. Die Beatfrequenz  $f_{\text{Beat}}$  steuert bei vorgegebener Anzahl  $n$  der Mittelungen die maximal mögliche Messrate  $f_{\text{sample}}$ :

$$f_{\text{sample}} = \frac{\bar{f}_{\text{Beat}}}{n} \quad (5)$$

Bei einem hohen Offset der Beatfrequenz und einem demgegenüber kleinem Modulationshub der Beatfrequenz ist die Messrate  $f_{\text{sample}}$  des ereignisgesteuerten Frequenz-Zählers annähernd konstant und hauptsächlich durch die Totzeit des Frequenz-Zählers limitiert.

Das Bild 10 verdeutlicht die ereignisgesteuerte Frequenzzählung. Jeder Nulldurchgang der Detektor-Ausgangsspannung  $u_{\text{Beat}}$  wird vom Trigger des Frequenz-Zählers erkannt. Dabei startet eine positive Flanke der Detektor-Ausgangsspannung  $u_{\text{Beat}}$  ein Triggerereignis, eine negative Flanke stoppt es wieder. Mit dem Start des ersten Triggerereignisses beginnt die Messung der Zeit  $T_n$ . Nachdem die voreingestellte Anzahl  $n$  von Triggerereignissen erreicht ist, wird die Zeitmessung beendet.

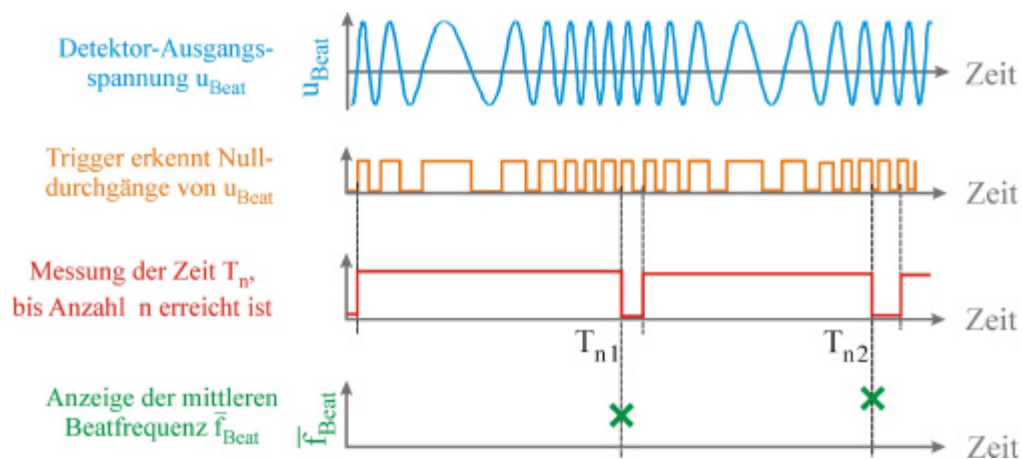


Bild 10: Prinzipielle Darstellung der Bestimmung der mittleren Beatfrequenz  $\bar{f}_{\text{Beat}}$  mit einem Frequenz-Zähler, der eine ereignisgesteuerte Torzeit  $T_n$  hat. Der Hub der Beatfrequenz ist gegenüber der Träger- bzw. Offsetbeatfrequenz stark überhöht dargestellt.

Bei Signalverzerrungen ist es sinnvoll, Triggerereignisse nur mit den positiven oder nur mit den negativen Flanken der Nulldurchgänge auszulösen. Dann wird lediglich jeder zweite Nulldurchgang erkannt und in der Gl. (4) darf die erkannte Anzahl  $n$  nicht mehr durch zwei dividiert werden.

Bei der Festlegung der Anzahl  $n$  von Nulldurchgängen, über die die Frequenz  $f_{\text{Beat}}$  gemittelt werden soll, muss je nach Anwendungsfall ein Kompromiss aus der Verfolgbarkeit des Belastungsvorgangs und der effektiven Mittelung gefunden werden. Bei einer kleinen Anzahl  $n$  von Mittelungen lässt sich der Einschwingvorgang mit seinen Eigenfrequenzen noch gut verfolgen. Dafür dauert es länger, bis der statische Endwert vorhergesagt wird (Bild 11). Bei einer großen Anzahl  $n$  von Mittelungen wird der statische Endwert entsprechend schnell bestimmt, dafür kann der Einschwingvorgang nicht genauer verfolgt werden.

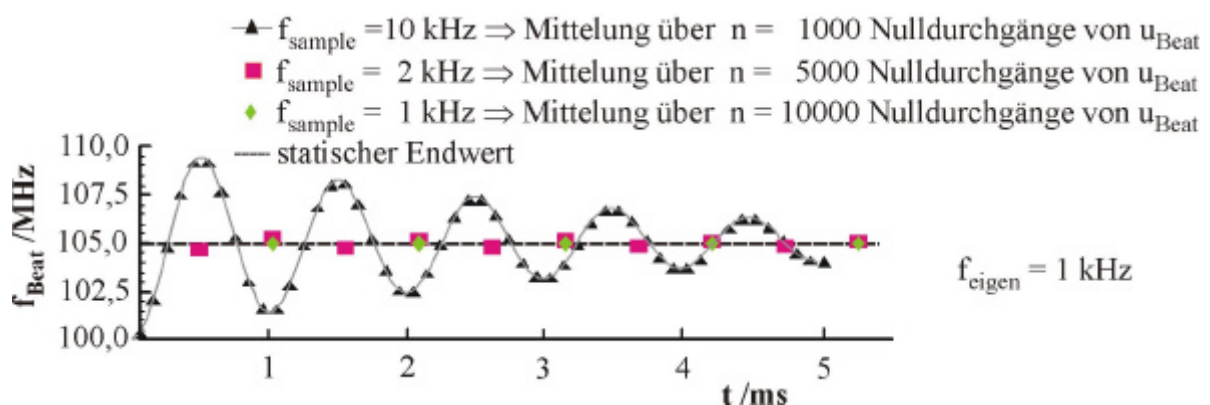


Bild 11: Rechnerische Simulation der Messung der mittleren Beatfrequenz  $\bar{f}_{\text{Beat}}$  mit verschiedenen Messraten  $f_{\text{sample}}$  und korrespondierende Mittelungsanzahlen  $n$  von Nulldurchgängen der Detektor-Ausgangsspannung  $u_{\text{Beat}}$ .

Im Extremfall könnte der Frequenz-Zähler mit dem Beginn des Einschwingvorgangs gestartet und die Messung der Torzeit  $T_n$  erst nach dem Erreichen des statischen Endwerts gestoppt werden. Obwohl die Messrate  $f_{\text{sample}}$  dabei viel kleiner ist als die Eigenschwingfrequenzen, wird der Mittelwert des Einschwingvorgangs korrekt bestimmt. Das ist eine wichtige Eigenschaft des frequenzanalogen Messsignals. Bei einem amplitudenanalogen Signal führt dagegen eine zu kleine Messrate  $f_{\text{sample}}$  zur Unterabtastung, wodurch nicht nur die Schwingungskomponenten, sondern auch die mittlere Amplitude falsch bestimmt werden würde. Um die Schwingungskomponenten des Einschwingvorgangs zu erkennen, muss natürlich auch bei dem frequenzanalogen Signal die Messrate  $f_{\text{sample}}$  hoch genug gewählt werden, sodass keine Unterabtastung der Eigenschwingungen des untersuchten Systems auftreten.

Mit dem Verfahren der ereignisgesteuerten Torzeitmessung wurden Belastungsvorgänge im dynamischen Kraftprüfstand vermessen, um den statischen Endwerts des Einschwingvorgangs möglichst schnell zu bestimmen. Die Piezoaktor-Ansteuerspannung hatte dabei einen trapezförmigen Verlauf (Bild 12). Damit kann z.B. der Verlauf der auf eine Wägezelle einwirkenden Gewichtskraft simuliert werden, wenn Wägestücke mit einem Band über eine dynamische Waage transportiert werden. Die Wiederholrate der Piezoaktor-Ansteuerspannung entspricht einem Durchsatz von 50 Wägestücken pro Sekunde bzw. einem zeitlichen Abstand von 20 ms zwischen den Wägestücken. Da nur während einem Drittel dieser Zeit die Belastung mit der simulierten Gewichtskraft konstant ist, muss in weniger als sieben Millisekunden die Gewichtskraft bestimmt werden.

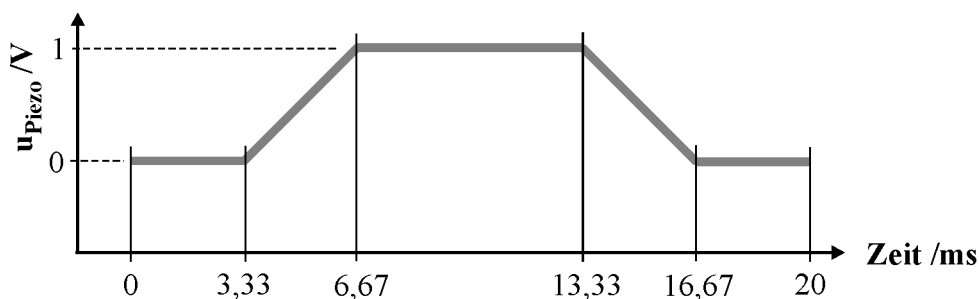


Bild 12: Verlauf der Piezoaktor-Ansteuerspannung  $u_{\text{Piezo}}$  bei der trapezförmigen Belastung und einer 50 Hz Wiederholrate.

Die Beatfrequenz  $f_{\text{Beat}}$  des Laserkraftsensors wurde mit dem Frequenz-Zähler Philips PM 6680 gemessen, der eine ereignisgesteuerte Torzeit  $T_n$  hat. Es wurden  $n = 1000$  Nulldurchgänge gewählt, für die die mittlere Beatfrequenz  $\bar{f}_{\text{Beat}}$  bestimmt wird. Die Messrate beträgt  $f_{\text{sample}} = 2,3 \text{ kHz}$ . Die Messergebnisse von fünf aufeinanderfolgenden trapezförmigen Belastungsvorgängen sind im Bild 13 gezeigt. Die Messrate  $f_{\text{sample}}$  ist hinreichend groß, bzw. die Anzahl  $n$  von Mittelungen ist noch so klein, dass die mechanischen Eigenschwingungen des Prüfstands erkennbar sind. Die Eigenschwingungen sind noch nicht abgeklungen, wenn der neue Belastungsvorgang beginnt. Der Hub  $\Delta f_{\text{Beat}}$  der Beatfrequenz entspricht einer Kraft  $F_x = 0,1 \text{ N}$ . Für insgesamt 15 solcher gemessenen Belastungsvorgänge ergab sich eine relative Reproduzierbarkeit des gemessenen Hubs

der Beatfrequenz von zwei Promille bezogen auf den Messwert. Dabei haben sowohl der Laserkraftsensor als auch der Prüfstand einen Anteil an der Reproduzierbarkeit. Die Aufteilung der Anteile konnte noch nicht experimentell ermittelt werden, weil es keinen hinreichend genauen und breitbandigen Referenzkraftsensor gibt, der in den Prüfstand hätte integriert werden können.

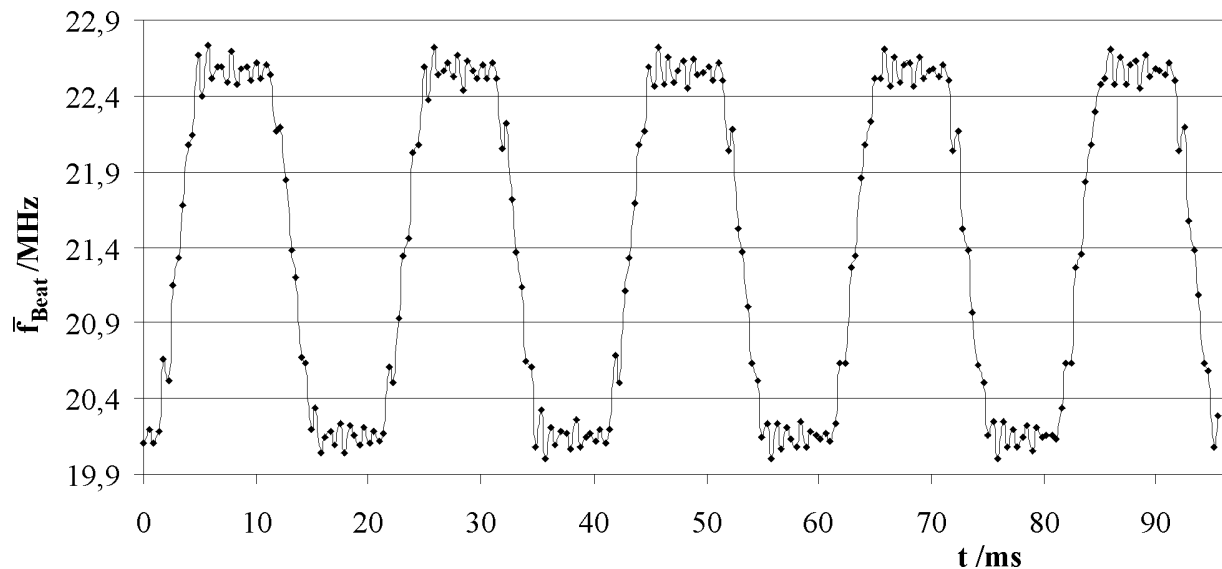


Bild 13: Gemessene Beatfrequenz  $\bar{f}_{\text{Beat}}$  mit der Mittelungsanzahl  $n = 1000$  bei der trapezförmigen Belastung im Kraftprüfstand. Der zeitliche Abstand der Belastungsvorgänge beträgt 20 ms, die Messrate  $f_{\text{sample}}$  beträgt 2,3 kHz.

Zur Interpretation der Ergebnisse könnte der Kraftprüfstand vereinfacht als Waage aufgefasst werden. Der statische Endwert des Einschwingvorgangs entspricht dann der Gewichtskraft des Wägestücks. Die Wägezelle hat so eine mechanische Eigenfrequenz von 700 Hz bei der Steifigkeit von  $2,4 \cdot 10^6$  N/m und der schwingenden Gesamtmasse von 0,12 kg. Die Be- und Entlastungsvorgänge entsprechen der Verwiegung von 10 g Wägestücken bei einem Durchsatz von 50 Stück pro Sekunde, wobei jedes Wägestück mit Promille-Genauigkeit bestimmt wird.

#### 4 Schlussfolgerungen

Wir haben die Eignung des Laserkraftsensors zur genauen Messung von transienten mechanischen Schwingungsvorgängen untersucht. Hierbei interessiert sowohl das Schwingenspektrum als auch eine möglichst präzise Prädiktion des statischen Endwertes der transienten Kraft. Voraussetzung hierfür ist die möglichst verzerrungsfreie Messung der Kraft, d.h. sowohl dynamisch bedingte Verzerrungen durch das Einschwingverhalten des Sensors als auch Verzerrungen durch Nichtlinearitäten der Sensorkennlinie müssen möglichst gering sein. Gefordert ist somit sowohl ein proportionales Messverhalten als auch eine hinreichend große Messbandbreite des verwendeten Sensors.

Der Laserkraftsensor liefert ein frequenzanaloges Ausgangssignal, welches über viele Dekaden hochgradig proportional zur Messkraft  $F_x$  ist. Der Sensor offeriert neben einer guten Linearität auch eine hohe Messbandbreite. Sowohl statische Kräfte als auch oszillierende Kräfte mit Modulationsfrequenzen im 100 kHz-Bereich können präzise gemessen werden. Darüber hinaus ist die Detektierbarkeit von sehr hochfrequenten Schwingungen bis in den Megahertzbereich experimentell nachgewiesen. Bemerkenswert ist, dass die Messempfindlichkeit  $E_{\text{mess}}$  des Lasersensors nicht von seiner Messbandbreite abhängt. Bei den weit verbreiteten DMS-Kraftaufnehmern ist dagegen die statische Empfindlichkeit mit der Messbandbreite bzw. der mechanischen Eigenfrequenz verkoppelt. Hier steigt die mechanische Eigenfrequenz – und damit die Messbandbreite – mit der Wurzel der Steifigkeit, gleichzeitig sinkt aber die Messempfindlichkeit proportional zur Steifigkeit der Messzelle. Auch piezoelektrische Kraftsensoren bieten eine hohe Steifigkeit und eine hohe Messbandbreite, sind also für die Messung von Schwingungskomponenten gut geeignet. Sie eignen sich aber nicht zur Messung von statischen Kräften, da ihr Ausgangssignal durch Ladungsausgleichvorgänge zeitabhängig sinkt. Andere Sensoren, die wie der Lasersensor nach dem Resonanzprinzip arbeiten, z.B. Schwingquarz- oder Schwingsaitensensoren, zeigen einen prinzipiell nichtlinearen Kennlinienverlauf. Daher scheiden diese Sensoren für unsere Zwecke aus.

Im Experiment war der Laserkraftsensor in einen Kraftprüfstand integriert, um sowohl die Schwingungskomponenten als auch die statischen Endwerte von definiert erzeugten transienten Schwingkräften zu erfassen. Durch sprungförmige Kraftanregungen wurden alle mechanischen Eigenfrequenzen des Prüfstands angeregt. In Übereinstimmung mit dem Modell des Prüfstands konnten die mechanischen Eigenfrequenzen bis hinauf zur Resonanz/Antiresonanzstelle der Minimal-konfiguration des Laserkraftsensors von 112 kHz nachgemessen werden.

Um die Messung des statischen Endwerts von Einschwingvorgängen mit dem Laserkraftsensor zu untersuchen, konnten im Kraftprüfstand Be- und Entlastungsvorgänge erzeugt werden, wie sie beispielsweise auch in der dynamischen Wägetechnik vorkommen. Die Beatfrequenz  $f_{\text{Beat}}$  des Laserkraftsensors wurde mit einem Frequenz-Zähler mit ereignisgesteuerter Torzeit ermittelt. Damit lässt sich der statische Endwert des Einschwing- bzw. Belastungsvorgangs in Realtime schnell aus den gemessenen Eigenschwingungen des mechanischen Systems extrapolieren. Bei den trapezförmigen Belastungsvorgängen mit der Kraftamplitude 0,1 N und der Wiederholrate 50 Hz konnte der statische Endwert mit einer Reproduzierbarkeit von zwei Promille, bezogen auf den Messwert, ermittelt werden. Der Prüfstand zeigte während der gesamten Be- und Entlastungsvorgänge deutliche Eigenschwingungen. Die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse des Laserkraftsensors mit dem Frequenz-Zähler ist dabei besser als die so ermittelten zwei Promille, da hierin noch die Reproduzierbarkeit der Be- und Entlastungsvorgänge mit dem Kraftprüfstand enthalten ist.



## Literatur

- [1] W. Holzapfel, S. Neuschaefer-Rube, M. Kobusch: „High-resolution very broadband force measurements by solid-state laser transducers“, Measurement 28 (2000), pp 277 – 291
- [2] A. Owyong, P. Esherick: „Stress-induced tuning of a diode-laser-excited monolithic Nd:YAG laser“, Optics Letters Vol. 12, No. 12, 1987
- [3] T. Yoshino, M. Kawata, B. Qimude, M. Hayashi, Y. Takahashi: „Fiber-Coupling-Operated Orthogonal-Linear-Polarization Nd:YAG Microchip Laser: Photothermal Beat-Frequency Stabilization and Interferometric Displacement Measurement Application“, Journal Of Lightwave Technology, Vol. 16, No. 3, 1998
- [4] M. Kobusch: „Zur dynamischen Kraftmessung mit monolithischen Laserkristallen“, Dissertation im Fachbereich Maschinenbau der Universität Kassel, 2002
- [5] G. Jäger: „Ein Beitrag zur dynamischen Wägetechnik“, wägen + dosieren, 2/1994

## Autorenangaben:

Dipl.-Ing. Martin Suske

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Holzapfel

Universität Kassel, Fachbereich Maschinenbau, Institut für Mess- und Automatisierungstechnik

Mönchebergstraße 7

34109 Kassel

Tel.: 0561/804-2757

Fax: 0561/804-2747

E-mail: martin.suske@uni-kassel.de